Environnement Canada Environment Canada

Institut national de recherches en hydrologie

RAPPORT N° 8 DE L'INRH
ÉTUDE N° 114, COLLECTION DES RAPPORTS TECHNIQUES DE LA DGEI

Interactions potentielles entre le pipeline et le sol dans les régions du Nord

R.O. van Everdingen

INRH

INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHES EN HYDROLOGIE
DIRECTION GÉNÉRALE DES EAUX INTÉRIEURES
OTTAWA, CANADA, 1982

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1982

N° de cat. En 36-503/114F

ISBN 0-662-91734-0

Table des matières

	Page
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	v
INTRODUCTION	1
TYPES DE PIPELINE	1
Mode de construction	1
Mode de fonctionnement	2
FACTEURS RELATIFS AU TERRAIN	2
État du sol à l'origine	2
«Nature» du sol	2
INTERACTIONS ET EFFETS POTENTIELS	2
Pendant la construction	2
En cours d'exploitation	5
Après la mise hors service	7
DONNÉES NÉCESSAIRES POUR DISCERNER LES PROBLÈMES À L'AVANCE	7
REMERCIEMENTS	7
RÉFÉRENCES	7

Tableau

1.	Interactions potentielles entre le pipeline et le sol et leurs effets dans les régions du Nord	3

Résumé

Dans l'environnement du Nord, plusieurs genres d'interactions entre un pipeline et le terrain qu'il traverse peuvent produire des effets défavorables affectant l'intégrité du pipeline; en outre, elles peuvent engendrer des répercussions environnementales, soit directement, soit en conséquence des travaux d'entretien ou de réparation requis. Dans toute situation donnée, les interactions et l'importance de leurs effets seront fonction des modes de construction (souterrain ou au-dessus du sol, par exemple) et d'opération (refroidi ou réchauffé, par exemple); de la répartition et de la nature du pergélisol; et de la vulnérabilité du sol au gel ou au dégel. En général, les interactions envisagées surgiront à cause de la présence et de la circulation des eaux de surface et souterraines et de la présence ou de la génération de glace. Un tableau d'interactions et de leurs effets probables est présenté en tant que guide aux problèmes qui peuvent se poser lors de la construction et de l'exploitation, autant qu'après l'abandon du pipeline. Si les problèmes sont discernés à l'avance, il est possible de les éviter en modifiant le tracé ou en prenant des mesures spéciales de conception ou de construction. Dans la majorité des cas, il faut réaliser à cet effet, des études détaillées sur le niveau, le débit et la température des eaux souterraines, sur l'accumulation de glaces, aussi bien que sur la répartition et la nature du pergélisol riche en glace.

Abstract

In a northern environment various interactions between pipelines and the terrain which they cross may produce adverse effects on pipeline integrity; adverse effects on the environment may also result, either directly or as a consequence of the increased maintenance or repairs required. In any particular situation the interactions and the severity of their effects will depend on the pipeline construction mode (e.g. buried or above-ground) and operation mode (e.g. chilled or warm); on the distribution of frozen and nonfrozen ground; and on the relative sensitivity of the ground during freezing and/or thawing. Most of the interactions are related to the occurrence and movement of surface water and subsurface water or to the occurrence or formation of ice. A tabulation of possible interactions and effects is presented as a guide to the potential problems that may occur during the construction and operation, as well as after abandonment, of a pipeline. When recognized early enough, development of such problems can often be avoided by rerouting or prevented by special design measures. Early recognition can in most cases only be achieved through special studies on groundwater levels, flow rates and temperatures; on the occurrence of icings; and on the distribution and character of ground ice.

Interactions potentielles entre le pipeline et le sol dans les régions du Nord

R.O. van Everdingen

INTRODUCTION

En vue de transporter à grand débit le pétrole et le gaz naturel du nord de l'Alaska, du delta du Mackenzie et des îles arctiques vers le sud du Canada et des États-Unis, les promoteurs doivent maintenant innover en matière de pipelines pour garantir, à prix raisonnable, leur solidité dans le Nord avec un minimum de risques pour l'environnement. En particulier, les problèmes spéciaux reliés à l'étendue des régions au sol constamment gelé (pergélisol) tant en Alaska que dans le nord du Canada (Ferrians et coll., 1969) requièrent ces innovations tant au plan de la conception que de la construction. L'expérience dans ce domaine est très limitée car jusqu'à ces dernières années, nulle part au monde on n'avait exploité de pipelines souterrains à grand diamètre dans des zones de pergélisol.

L'oléoduc réchauffé Alyeska qui relie le nord de l'Alaska à Valdez est élevé sur des supports verticaux sur près de la moitié de sa longueur pour éviter la fonte du pergélisol dans les sols dont les constituants peuvent réagir mal au dégel. En deux endroits où il est souterrain, on a découvert de petites cassures qui sont dues à un «plissement» des parois, incident qui fait douter de la possibilité de déterminer avec exactitude toutes les zones du tracé d'un pipeline où il existe un pergélisol stable en cas de dégel et où l'on peut donc enfouir en toute sécurité un pipeline réchauffé.

Les projets de gazoducs de la vallée du Mackenzie et, plus récemment, de la route de l'Alaska prévoyaient généralement une construction souterraine, le gaz étant refroidi sur une partie au moins des tronçons afin d'éviter un dégel préjudiciable au pergélisol. Au cours de l'enquête sur le premier, on a identifié un effet secondaire potentiellement nuisible du refroidissement, à savoir le foisonnement différentiel dû au gel de terrains non gelés sensibles. On a constaté qu'il était impraticable de limiter le foisonnement par l'enfouissement profond du pipeline et l'utilisation d'une surcharge (sous forme d'une banquette), sur la base du principe de la pression statique. L'efficacité d'autres dispositions, comme l'isolation de la conduite, le réchauffement localisé ou le refroidissement rapide, le remplacement des sols sensibles par du remblayage stable et l'utilisation de joints coulissants n'a pas été démontrée jusqu'ici.

En plus des problèmes que peuvent poser le foisonnement dû au gel et l'affaissement dû au dégel, Berger (1977) a identifié plusieurs autres caractéristiques géotechniques qui pourraient menacer la solidité du pipeline et présenter un danger pour l'environnement. Il s'agit entre autres de la stabilité des pentes (problèmes de reptation), le drainage et l'érosion de surface, le drainage souterrain et l'accumulation de glace.

Pour le gazoduc de la route de l'Alaska, les promoteurs avaient avancé que sa construction au-dessus du sol dans un remblai composé de matériaux granulaires préviendrait le foisonnement (autour des tronçons refroidis) ou l'affaissement (autour des tronçons réchauffés). Lors des audiences techniques tenues à Whitehorse par une commission d'évaluation des effets sur l'environnement (*The Alaska Highway Gas Pipeline Environmental Assessment Panel*), on a fait valoir que la construction en «banquette», tout en permettant d'éviter une partie des problèmes susmentionnés, pouvait également engendrer des problèmes supplémentaires d'ordre géotechnique et environnemental.

Lorsqu'ils sont connus suffisamment à l'avance, il est possible d'éviter certains des problèmes relatifs au terrain en modifiant le tracé; quant aux autres problèmes, on peut les prévenir en modifiant la conception du pipeline ou les méthodes de construction. L'énumération des interactions possibles entre un pipeline et le terrain et de leurs effets présentée ci-après peut contribuer à l'identification rapide de nombre de ces problèmes.

TYPES DE PIPELINE

Mode de construction (Tableau 1, colonne 1)

Deux modes sont actuellement envisagés pour le Nord: la construction souterraine et la construction en banquette au-dessus du sol. Le premier mode, que l'industrie du pipeline semble préférer pour les gazoducs à grand diamètre et à haute pression, consiste à installer la conduite dans une tranchée qu'on comble de matériaux d'excavation, ou de matériaux de remblayage sélectionnés (stables) ou avec un mélange de ces deux sortes. Le second, que l'on préconise

pour certains endroits vulnérables sur le tracé du gazoduc de la route de l'Alaska, consiste à placer la conduite dans un remblai ou une banquette de matériaux granulaires (par exemple du gravier).

Le mode surélevé qui a été utilisé pour une grande partie du tronçon de l'oléoduc Alyeska ne figure pas au tableau 1 étant donné que ses interactions avec le sol sont censées être mineures. Dans ce cas, la canalisation isolée repose sur des supports verticaux à une certaine distance au-dessus du sol. En cas de nécessité, des échangeurs de chaleur automatiques peuvent être installés dans les supports pour empêcher le dégel du pergélisol. Cependant, l'industrie du pipeline n'estime pas que ce mode de construction convienne au gazoduc à grand diamètre et à haute pression.

Mode de fonctionnement (Tableau 1, colonne 2)

Les conduites peuvent être réchauffées ou refroidies. Les oléoducs sont généralement réchauffés, comme les gazoducs qui pourraient aussi être refroidis à une température inférieure au point de congélation du sol environnant, pour éviter le dégel du pergélisol. Au Yukon, le gazoduc de la route de l'Alaska recevrait du gaz refroidi à la frontière de l'Alaska. Le gaz serait maintenu à cette température jusqu'au premier ou troisième compresseur, au Yukon, après quoi il serait transporté à des températures supérieures à 0°C.

FACTEURS RELATIFS AU TERRAIN

État du sol à l'origine (Tableau 1, colonne 3)

À l'origine, le sol peut être gelé ou non gelé. Certains sols à fine texture ne peuvent être que partiellement gelés, contenant une certaine partie d'eau liquide dont la température est inférieure à 0°C. Dans le contexte du tableau 1, considérer ces sols comme gelés pour les cas et les périodes où ils seront exposés au dégel par suite de la construction ou du fonctionnement du pipeline et les considérer comme non gelés pour les cas et les périodes où ils seront exposés à la congélation supplémentaire.

Le tableau 1 porte l'attention surtout sur les *zones de transition* entre le sol gelé et non gelé, où l'affaissement et le foisonnement risquent le plus d'endommager le pipeline en lui faisant subir des mouvements différentiels.

«Nature» du sol (Tableau 1, colonne 4)

Le sol est caractérisé au tableau 1 par les termes sensible ou stable. Le premier désigne le sol gelé sensible au dégel et le sol non gelé sensible au gel tandis que le second désigne le sol gelé qui reste stable en cas de dégel et le sol non gelé qui reste stable en cas de gel.

On doit souligner ici que la stabilité ou la sensibilité du sol dépend en fait non seulement de sa granulométrie et de sa composition, mais aussi du drainage souterrain et de la température. Une matière classée comme stable au gel (sur la base des analyses classiques de laboratoire) peut faire partie d'un système qui, lui, est sensible. De la même façon, même s'il contient des matières considérées comme sensibles, le système peut rester stable en cas de gel si le drainage ou la température empêche l'accumulation excessive de glace. Par ailleurs, un sol sensible au dégel peut se comporter comme un sol stable si le processus est suffisamment lent pour permettre le drainage de l'eau sans augmentation «excessive» de pression aux pores.

Bien que le tableau 1 ne le mentionne pas expressément, les zones de transition entre le sol sensible et le sol stable constituent un deuxième ensemble de points où le pipeline risque le plus d'être endommagé par suite de mouvements différentiels.

INTERACTIONS ET EFFETS POTENTIELS

Pendant la construction (Tableau 1, colonnes 5 et 6)

Les principaux travaux sont alors le déblaiement du terrain et l'aménagement de l'emprise; la construction des routes d'accès; le creusement de la tranchée, puis la pose du pipeline et le remblayage, ou la construction d'un remblai puis la pose du pipeline et son recouvrement; et les essais hydrostatiques. Dans certains cas, jusqu'à 2 ans peuvent s'écouler entre la pose du pipeline et le début de son exploitation.

Les premiers effets du déblaiement peuvent comprendre le gel en profondeur des sols non gelés et le dégel en profondeur des sols constamment gelés, accompagnés peut-être de foisonnement ou d'affaissement selon le cas. Sur le plan local, le dégel du pergélisol riche en glace peut nuire à la stabilité des pentes.

En outre, il peut être nécessaire d'épuiser l'eau des pentes naturelles traversées par le pipeline, et d'un certain nombre de pentes de déblai, en vue d'améliorer leur stabilité. La conception de systèmes d'épuisement appropriés peut s'avérer très difficile, étant donné que les drains peuvent geler en hiver lorsque l'écoulement est faible et que l'élimination de l'eau drainée peut donner lieu à la formation d'étangs ou à l'accumulation de glace. Le gel et le dégel saisonniers peuvent également causer l'instabilité de pentes de déblai apparemment stables où l'on n'observe pratiquement pas de suintement. De telles pentes peuvent s'effondrer de façon répétée pendant les dégels successifs du printemps en raison d'une lente accumulation de pression sous la couche gelée du déblai pendant l'hiver. Il n'est pas

TABLEAU 1. INTERACTIONS POTENTIELLES ENTRE LE PIPELINE ET LE SOL ET LEURS EFFETS DANS LES RÉGIONS DU NORD

PIPELINE		TERRAIN		INTERACTIONS ET EFFETS						
				PENDANT LA CONSTRUCTION		EN COURS D'EXPLOITATION				APRÈS LA M
MODE DE CONSTRUCTION	MODE DE FONCTIONNEMENT	ÉTAT DU SOL À L'ORIGINE	«NATURE» DU SOL	SOL	EAU	SOL	PIPELINE	EAUX SUPERFICIELLES	EAUX SOUTERRAINES	SOL
SOUTERRAINE (avec ou sans isolation)	REFROIDI (T < 0°C)	GELÉ	STABLE	DÉGEL	ÉCOULEMENT des EAUX SUPERFICIELLES sur l'EMPRISE et des EAUX SOUTERRAINES dans le REMBLAYAGE; FORMATION d'ÉTANGS, ÉROSION, ACCUMULATIONS de GLACE; risques d'EFFONDREMENT des PENTES	GEL	——	——	——	——
			SENSIBLE	DÉGEL, AUGMENTATION de l'ÉPAISSEUR de la COUCHE NON GELÉE, INSTABILITÉ des PENTES		GEL, FOISONNEMENT	POUSSÉE VERTICALE	FORMATION d'ÉTANGS, ACCUMULATIONS de GLACE, ÉROSION de l'EMPRISE	——	AUGMENTATION de l'ÉPAISSEU de la COUCHE NON GELÉE INSTABILITÉ des PENTES
		ZONE DE TRANSITION	S.O.	AUGMENTATION des CONTRAINTES S'EXERÇANT sur le PIPELINE (risques de RUPTURE)		FOISONNEMENT DIFFÉRENTIEL MAXIMAL	AUGMENTATION MAXIMALE des CONTRAINTES S'EXERÇANT sur le PIPELINE; RUPTURE du PIPELINE		S.O.	S.O.
		NON GELÉ	SENSIBLE	GEL, FOISONNEMENT	Comme ci-dessus, et en plus: INONDATION de la TRANCHÉE, EFFONDREMENT saisonnier des TALUS de DÉBLAI	GEL, FOISONNEMENT	POUSSÉE VERTICALE		RESTRICTION de l'ÉCOULEMENT NOUVEAUX EXUTOIRES, ACCUMULATIONS de GLACE, TERTRES de GEL	DÉGEL, AUGMENTATION de l'EPAI de la COUCHE NON GELÉE INSTABILITÉ des PENTES
			STABLE	GEL		GEL	——			DÉGEL
	RÉCHAUFFÉ (T > 0°C)	GELÉ	STABLE	DÉGEL	ÉCOULEMENT des EAUX SUPERFICIELLES sur l'EMPRISE et des EAUX SOUTERRAINES dans le REMBLAYAGE; FORMATION d'ÉTANGS, ÉROSION, ACCUMULATIONS de GLACE; risques d'EFFONDREMENT des PENTES	DÉGEL	——		ÉCOULEMENT dans le REMBLAYAGE: «CANALISATION», ACCUMULATIONS de GLACE, NOUVEAUX EXUTOIRES	GEL
			SENSIBLE	DÉGEL, AUGMENTATION de l'ÉPAISSEUR de la COUCHE NON GELÉE, INSTABILITÉ des PENTES		DÉGEL, AUGMENTATION de l'ÉPAISSEUR de la COUCHE NON GELÉE, INSTABILITÉ des PENTES	AFFAISSEMENT			GEL, FOISONNEMENT
		ZONE DE TRANSITION	S.O.	AUGMENTATION des CONTRAINTES S'EXERÇANT sur le PIPELINE (risques de RUPTURE)		DIFFÉRENCE MAXIMALE de l'AUGMENTATION de l'ÉPAISSEUR de la COUCHE NON GELÉE	AUGMENTATION MAXIMALE des CONTRAINTES S'EXERÇANT sur le PIPELINE; RUPTURE du PIPELINE		S.O.	S.O.
		NON GELÉ	SENSIBLE	GEL, FOISONNEMENT	Comme ci-dessus, et en plus: INONDATION de la TRANCHÉE, EFFONDREMENT saisonnier des TALUS de DÉBLAI	RÉCHAUFFEMENT	——		ÉCOULEMENT dans le REMBLAYAGE: «CANALISATION», ACCUMULATIONS DE GLACE, NOUVEAUX EXUTOIRES	——
			STABLE	GEL		RÉCHAUFFEMENT	——			——
EN BANQUETTE, AU-DESSUS DU SOL (avec ou sans isolation)	REFROIDI (T < 0°C)	GELÉ	STABLE	TASSEMENT (couche active)	FORMATION d'ÉTANGS, INFILTRATIONS dans les BANQUETTES, ÉROSION, ACCUMULATIONS de GLACE; RESTRICTION de l'ÉCOULEMENT et NOUVEAUX EXUTOIRES des EAUX SOUTERRAINES, TERTRES de GEL; risques d'ENDOMMAGEMENT ou de RUPTURE des BANQUETTES aux PONCEAUX	TASSEMENT (couche active)	AFFAISSEMENT	FORMATION d'ÉTANGS, INFILTRATIONS dans les BANQUETTES, ACCUMULATIONS de GLACE, risques d'ENDOMMAGEMENT ou de RUPTURE des BANQUETTES aux PONCEAUX	RESTRICTION de l'ÉCOULEMENT, NOUVEAUX EXUTOIRES, ACCUMULATIONS de GLACE, et TERTRES de GEL	——
			SENSIBLE	AFFAISSEMENT dû au DÉGEL						——
		ZONE DE TRANSITION	S.O.	TASSEMENT DIFFÉRENTIEL		TASSEMENT DIFFÉRENTIEL	AUGMENTATION des CONTRAINTES S'EXERÇANT sur le PIPELINE			S.O.
		NON GELÉ	SENSIBLE	FOISONNEMENT dû au GEL		TASSEMENT; FOISONNEMENT	AFFAISSEMENT; POUSSÉE VERTICALE			DÉGEL, AUGMENTATION de l'ÉPAISSEUR de la COUCHE NON GELÉE
			STABLE	TASSEMENT		TASSEMENT, GEL	AFFAISSEMENT			DÉGEL
	RÉCHAUFFÉ (T > 0°C)	GELÉ	STABLE	TASSEMENT (couche active)		TASSEMENT (couche active)	AFFAISSEMENT			GEL
			SENSIBLE	AFFAISSEMENT dû au DÉGEL		TASSEMENT; DÉGEL, AUGMENTATION de l'ÉPAISSEUR de la COUCHE NON GELÉE	AFFAISSEMENT IMPORTANT			GEL, FOISONNEMENT
		ZONE DE TRANSITION	S.O.	TASSEMENT DIFFÉRENTIEL		TASSEMENT DIFFÉRENTIEL	AUGMENTATION des CONTRAINTES S'EXERÇANT sur le PIPELINE			S.O.
		NON GELÉ	SENSIBLE	FOISONNEMENT dû au GEL		TASSEMENT	AFFAISSEMENT			——
			STABLE	TASSEMENT						——

R.O. van Everdingen, Division de recherche en hydrologie, Direction générale des eaux intérieures, ENVIRONNEMENT CANADA, Calgary.

ELLES ENTRE LE PIPELINE ET LE SOL ET LEURS EFFETS DANS LES RÉGIONS DU NORD

TERRAIN			INTERACTIONS ET EFFETS							
			PENDANT LA CONSTRUCTION		EN COURS D'EXPLOITATION				APRÈS LA MISE HORS SERVICE	
	ÉTAT DU SOL À L'ORIGINE	«NATURE» DU SOL	SOL	EAU	SOL	PIPELINE	EAUX SUPERFICIELLES	EAUX SOUTERRAINES	SOL	EAU
	GELÉ	STABLE	DÉGEL	ÉCOULEMENT des EAUX SUPERFICIELLES sur l'EMPRISE et des EAUX SOUTERRAINES dans le REMBLAYAGE; FORMATION d'ÉTANGS, ÉROSION, ACCUMULATIONS de GLACE; risques d'EFFONDREMENT des PENTES	GEL	——	FORMATION d'ÉTANGS, ACCUMULATIONS de GLACE, EROSION de l'EMPRISE	——	——	——
		SENSIBLE	DÉGEL, AUGMENTATION de l'ÉPAISSEUR de la COUCHE NON GELÉE, INSTABILITÉ des PENTES		GEL, FOISONNEMENT	POUSSÉE VERTICALE		——	AUGMENTATION de l'ÉPAISSEUR de la COUCHE NON GELÉE, INSTABILITÉ des PENTES	FORMATION d'ÉTANGS, ACCUMULATIONS de GLACE, EROSION de l'EMPRISE
	ZONE DE TRANSITION	S.O.	AUGMENTATION des CONTRAINTES S'EXERÇANT sur le PIPELINE (risques de RUPTURE)		FOISONNEMENT DIFFÉRENTIEL MAXIMAL	AUGMENTATION MAXIMALE des CONTRAINTES S'EXERÇANT sur le PIPELINE; RUPTURE du PIPELINE		S.O.	S.O.	
	NON GELÉ	SENSIBLE	GEL, FOISONNEMENT	Comme ci-dessus, et en plus: INONDATION de la TRANCHÉE, EFFONDREMENT saisonnier des TALUS de DÉBLAI	GEL, FOISONNEMENT	POUSSÉE VERTICALE		RESTRICTION de l'ÉCOULEMENT: NOUVEAUX EXUTOIRES, ACCUMULATIONS de GLACE; TERTRES de GEL	DÉGEL, AUGMENTATION de l'ÉPAISSEUR de la COUCHE NON GELÉE, INSTABILITÉ des PENTES	comme ci-dessus, en plus: ÉCOULEMENT dans le REMBLAYAGE, EROSION par «CANALISATION»
									DÉGEL	
		STABLE	GEL		GEL	——		ÉCOULEMENT dans le REMBLAYAGE: «CANALISATION», ACCUMULATIONS de GLACE, NOUVEAUX EXUTOIRES	GEL	——
	GELÉ	STABLE	DÉGEL	ÉCOULEMENT des EAUX SUPERFICIELLES sur l'EMPRISE et des EAUX SOUTERRAINES dans le REMBLAYAGE; FORMATION d'ÉTANGS, ÉROSION, ACCUMULATIONS de GLACE; risques d'EFFONDREMENT des PENTES	DÉGEL	——				GEL, FOISONNEMENT	FORMATION d'ÉTANGS, ACCUMULATIONS de GLACE, EROSION de l'EMPRISE
		SENSIBLE	DÉGEL, AUGMENTATION de l'ÉPAISSEUR de la COUCHE NON GELÉE, INSTABILITÉ des PENTES		DÉGEL, AUGMENTATION de l'ÉPAISSEUR de la COUCHE NON GELÉE, INSTABILITÉ des PENTES	AFFAISSEMENT				
	ZONE DE TRANSITION	S.O.	AUGMENTATION des CONTRAINTES S'EXERÇANT sur le PIPELINE (risques de RUPTURE)		DIFFÉRENCE MAXIMALE de l'AUGMENTATION de l'ÉPAISSEUR de la COUCHE NON GELÉE	AUGMENTATION MAXIMALE des CONTRAINTES S'EXERÇANT sur le PIPELINE; RUPTURE du PIPELINE		S.O.	S.O.	
	NON GELÉ	SENSIBLE	GEL, FOISONNEMENT	Comme ci-dessus, et en plus: INONDATION de la TRANCHÉE, EFFONDREMENT saisonnier des TALUS de DÉBLAI	RECHAUFFEMENT	——		ÉCOULEMENT dans le REMBLAYAGE: «CANALISATION», ACCUMULATIONS DE GLACE, NOUVEAUX EXUTOIRES	——	comme ci-dessus, en plus: ÉCOULEMENT dans le REMBLAYAGE, EROSION par «CANALISATION»
									——	
		STABLE	GEL		RECHAUFFEMENT	——			——	——
	GELÉ	STABLE	TASSEMENT (couche active)	FORMATION d'ETANGS, INFILTRATIONS dans les BANQUETTES, EROSION, ACCUMULATIONS de GLACE, RESTRICTION de l'ECOULEMENT et NOUVEAUX EXUTOIRES des EAUX SOUTERRAINES, TERTRES de GEL; risques d'ENDOMMAGEMENT ou de RUPTURE des BANQUETTES aux PONCEAUX	TASSEMENT (couche active)	AFFAISSEMENT	FORMATION d'ETANGS, INFILTRATIONS dans les BANQUETTES, ACCUMULATIONS de GLACE, risques d'ENDOMMAGEMENT ou de RUPTURE des BANQUETTES aux PONCEAUX	RESTRICTION de l'ECOULEMENT, NOUVEAUX EXUTOIRES, ACCUMULATIONS de GLACE, et TERTRES de GEL	——	FORMATION d'ETANGS, EROSION, INFILTRATIONS dans les BANQUETTES; ECOULEMENT des EAUX SOUTERRAINES, TERTRES de GEL, ACCUMULATIONS de GLACE, risques d'ENDOMMAGEMENT ou de RUPTURE des BANQUETTES
		SENSIBLE	AFFAISSEMENT dû au DÉGEL		TASSEMENT DIFFERENTIEL	' AUGMENTATION des CONTRAINTES S'EXERÇANT sur le PIPELINE			——	
	ZONE DE TRANSITION	S.O.	TASSEMENT DIFFERENTIEL		TASSEMENT, FOISONNEMENT	AFFAISSEMENT, POUSSÉE VERTICALE			S.O.	
	NON GELÉ	SENSIBLE	FOISONNEMENT dû au GEL		TASSEMENT, GEL	AFFAISSEMENT			DÉGEL, AUGMENTATION de l'ÉPAISSEUR de la COUCHE NON GELÉE	
		STABLE	TASSEMENT		TASSEMENT (couche active)	AFFAISSEMENT			DÉGEL	
	GELÉ	STABLE	TASSEMENT (couche active)		TASSEMENT, DÉGEL, AUGMENTATION de l'ÉPAISSEUR de la COUCHE NON GELÉE	AFFAISSEMENT IMPORTANT			GEL	
		SENSIBLE	AFFAISSEMENT dû au DÉGEL						GEL, FOISONNEMENT	
	ZONE DE TRANSITION	S.O.	TASSEMENT DIFFERENTIEL		TASSEMENT DIFFERENTIEL	AUGMENTATION des CONTRAINTES S'EXERÇANT sur le PIPELINE			S.O.	
	NON GELÉ	SENSIBLE	FOISONNEMENT dû au GEL						——	
		STABLE	TASSEMENT		TASSEMENT	AFFAISSEMENT			——	

Juin 1979

R.O. van Everdingen, Division de recherche en hydrologie, Direction générale des eaux intérieures, ENVIRONNEMENT CANADA, Calgary.

pour
de la
remb
exem

parti
table
censé
repos
dessu
autor
empé
pipel
ne au

Mode

Les
gazo
ratur
pour
de la
de l'
jusqu
quoi

État

sols
conti
ratur
consi
où il
ou d
non
la co

trans
et le
line

«Nat

sensi
au d
seco
et le

toujours possible de déceler cette caractéristique suffisamment à l'avance pour éviter l'effondrement.

Dans les zones où la nappe phréatique est proche de la surface, la tranchée peut se remplir d'eau, ses parois peuvent devenir instables et dans certains cas où elle joue un rôle d'évacuation, elle peut subir une érosion importante. Il faudrait donc recourir au lestage du pipeline ou à l'épuisement de l'eau en vue de permettre la pose. Le lestage ou l'enfouissement profond du pipeline serait nécessaire pour neutraliser sa flottabilité après installation. Par ailleurs, l'affaissement progressif des matériaux de remblayage placés dans une tranchée remplie d'eau nécessiterait un entretien plus fréquent pour la maîtrise du drainage et de l'érosion. L'élimination de l'eau en vue d'une pose plus facile pourrait donner lieu à l'érosion des sols, à l'envasement des plans d'eau et, en hiver, à l'accumulation de glace.

Parfois, les problèmes que peut poser la présence d'une nappe phréatique proche de la surface n'apparaissent pas toujours avant ou pendant la construction. Toutefois, ils se présentent ultérieurement sous la forme d'une flottabilité inattendue du pipeline et peut-être d'un affaissement excessif des matériaux comblant la tranchée. Ces problèmes se poseront le plus souvent dans des zones où le sol a une bonne compétence mais une faible perméabilité, ainsi que dans des zones où la profondeur de la nappe phréatique connaît de grandes variations saisonnières si la construction a lieu pendant une période de bas niveau.

Le drainage artificiel et la prévention de l'érosion sont normalement nécessaires pour empêcher l'érosion superficielle de l'emprise. Cependant, la tranchée, dont le remblayage est généralement plus perméable que le sol environnant, peut canaliser tant les eaux de surface que les eaux souterraines, ce qui peut donner lieu à l'érosion du remblayage et à l'apparition de nouveaux exutoires où s'accumulera la glace en hiver. Le drainage des eaux dans le remblayage peut être particulièrement préoccupant lorsque le pipeline traverse un ou plusieurs cônes de déjection, en raison de la nature des alluvions et de l'hydraulique des cours d'eau à fort courant qui les ont formés. Dans ce contexte, on peut placer des bondes imperméables dans le remblayage en les espaçant de chaque côté du lit des cours d'eau existants pour empêcher l'écoulement de l'eau infiltrée. Cependant, ce type de cours d'eau est sujet aux avulsions (modifications du cours) par suite de l'accumulation de débris dans le lit. Lorsqu'une telle avulsion se produit, les eaux peuvent s'infiltrer dans les alluvions à un endroit dépourvu de bondes et s'écouler ensuite le long de la tranchée.

La construction de remblais en vue de l'installation en banquette au-dessus du sol et pour les routes d'accès désorganisera le drainage superficiel sauf si l'on aménage des ponceaux judicieusement placés et de taille appropriée. Un drainage insuffisant peut aboutir à la formation d'étangs et au suintement d'eau à la base du remblai, qui peut être suivi de son érosion et finalement de son effondrement. Par ailleurs, l'accumulation de glace peut obstruer les ponceaux en hiver de sorte que le dégel du printemps peut donner lieu à l'érosion et dans certains cas à l'effondrement d'un remblai. Enfin, le pipeline installé en banquette au-dessus du sol serait beaucoup plus exposé que le pipeline souterrain aux effets de l'érosion due aux avulsions des cours d'eau coulant sur des cônes de déjection.

La construction d'un remblai provoquera souvent le tassement du sol sous-jacent et, dans les zones de pergélisol, une élévation progressive du niveau du pergélisol sous le remblai. Lorsque les eaux souterraines ne peuvent plus s'écouler par suite de l'un ou l'autre de ces phénomènes, elles ont tendance à jaillir en amont du remblai, phénomène qui donne lieu aux problèmes de formation d'étangs et d'accumulation de glace. Dans certains cas, la présence d'un obstacle à l'écoulement des eaux souterraines peut se traduire par la formation de tertres de gel tels que ceux décrits par Eager et Pryor (1945) pour une zone située sur la route de l'Alaska et par van Everdingen (1978) pour une zone située près de Fort-McPherson.

Pendant les essais hydrostatiques après la pose des tronçons du pipeline, de grandes quantités d'eau seront prélevées du terrain environnant puis restituées. Les points et le volume des prélèvements et des restitutions peuvent être choisis de manière à réduire au minimum les incidences de telles opérations sur le milieu aquatique. Toutefois, il est à prévoir qu'un déversement accidentel du fluide utilisé pour les essais hydrostatiques pourrait se traduire par une érosion très forte le long de l'emprise et, partant, par l'envasement des plans d'eau voisins.

On peut escompter que la plupart des problèmes découlant des activités menées avant la mise en service du pipeline apparaîtront avant qu'une année passe après la fin de la construction. Il est probable que la solidité du pipeline ne sera menacée pendant cette période qu'en cas d'effondrement de la pente ou du remblai, ou de l'érosion de l'emprise ou du remblayage.

En cours d'exploitation (Tableau 1, colonnes 7 à 10)

La principale source d'interactions pendant l'exploitation d'un pipeline *souterrain* dans les régions du Nord sera l'échange de chaleur entre le pipeline et le sol. Un pipeline refroidi provoquera le gel de terrains non gelés,

tandis que s'il est réchauffé, il entraînera le dégel de sol gelé. L'isolation du pipeline permettra de réduire l'échange de chaleur et d'en atténuer les effets sur le sol mais sans les supprimer. Une installation en banquette au-dessus du sol pourrait les réduire davantage; une installation surélevée les éliminerait presque totalement.

Le gel dû à un pipeline souterrain *refroidi* n'aura guère d'effet sur un sol stable, qu'il soit gelé à l'origine ou non. En revanche, il peut entraîner une accumulation excessive de glace dans les sols déjà gelés qui sont sensibles au gel (Mackay et coll., 1979) et provoquer un foisonnement important dans les sols sensibles non gelés à l'origine. Lorsqu'il s'agit d'un pipeline refroidi, le foisonnement différentiel dû au gel se manifeste avec le plus d'intensité dans les zones de transition entre les sols sensibles non gelés à l'origine et les sols stables déjà gelés. Dans ces zones, le pipeline et son isolation seraient soumis aux contraintes les plus fortes et les risques de rupture y seraient les plus élevés. Dans toute situation donnée, les mouvements et la déformation du pipeline dépendraient en fait de facteurs comme la résistance à la poussée verticale, la rigidité du manchon de gel et la plus ou moins grande étendue de la zone de transition.

Le foisonnement sur l'emprise altérera le drainage des eaux de surface, ce qui donnera lieu probablement à la formation d'étangs, à l'accumulation de glace et à l'érosion possible le long de l'emprise.

Un manchon de gel (une zone de sol gelé) qui se forme autour d'un pipeline souterrain refroidi peut s'opposer à la circulation des eaux souterraines qui jailliront alors en amont du pipeline, ce qui nécessitera la mise en place de dispositifs supplémentaires de drainage en vue d'éviter l'érosion et la formation d'étangs pendant la belle saison ainsi que l'accumulation de glace en hiver. Par ailleurs, des dispositifs supplémentaires de drainage ne devront pas être probablement nécessaires aux points de franchissement de cours d'eau, mais l'accumulation de glace pourrait tarir l'eau des aires d'hivernage des poissons et accroître l'érosion latérale ainsi que la profondeur d'affouillement dans les petits cours d'eau.

Dans certains cas, les eaux souterraines obstruées par un manchon de gel pourraient former aussi des tertres de gel saisonniers en amont de l'emprise, tel que l'ont décrit Eager et Pryor (1945) et van Everdingen (1978). Ces tertres n'auraient probablement pas d'effet direct sur le pipeline, mais leur rupture entraînerait une accumulation de glace et leur présence lors du dégel de printemps pourrait désorganiser le régime local de drainage de surface.

Le dégel dû à un pipeline souterrain *réchauffé* n'aura guère d'effet sur un sol stable, que ce dernier soit gelé ou non à l'origine. En revanche, il entraînera la fonte de l'excès de glace, ce qui augmentera l'épaisseur de la couche non gelée et probablement l'instabilité du sol sensible gelé à l'origine. Ce type de pipeline sera le plus exposé à l'affaissement différentiel dans les zones de transition entre le sol gelé à l'origine qui est sensible au dégel et le sol stable gelé ou non. Les risques de rupture du pipeline dans l'une de ces zones seront les plus élevés là où la couche de glace excédentaire dans le sol sensible au dégel est la plus épaisse.

Les affaissements du sol de l'emprise donneront lieu à la formation d'étangs et à l'érosion possible.

Dans certains cas, le dégel du sol gelé à l'origine peut fournir de nouveaux exutoires aux eaux souterraines. À chaque point où le remblayage de la tranchée est plus perméable que le sol environnant, le dégel permettra à la tranchée de jouer le rôle de conduit souterrain. Les nouveaux exutoires d'eau souterraine qui en résulteraient pourraient nuire au drainage et donner lieu à l'accumulation de glace en hiver ainsi qu'à l'érosion progressive du remblayage par «canalisation».

Dans le cas d'un pipeline en banquette *au-dessus du sol*, le tassement du sol sous-jacent se poursuivrait probablement pendant l'exploitation mais ses effets seraient modifiés par le gel ou le dégel du sol. L'échange de chaleur entre le pipeline et le sol pourrait alors être moindre que pour l'installation souterraine mais resterait quand même important. Si le pipeline était refroidi, le gel du sol tendrait à ralentir le tassement des couches proches de la surface et la formation d'un excès de glace pourrait dans certains cas renverser le mouvement; s'il était réchauffé, provoquant ainsi un dégel du sol, il accélérerait le tassement et l'effet serait d'autant plus important où la présence d'une couche épaisse de glace excédentaire provoque un affaissement important.

Nombre des effets de l'échange de chaleur entre un pipeline et le sol peuvent apparaître seulement après quelques années d'exploitation.

La solidité du pipeline peut être menacée en cours de son exploitation par des contraintes beaucoup trop fortes découlant du foisonnement dû au gel ou de l'affaissement dû au dégel, notamment dans les zones de transition définies antérieurement; par l'effondrement de la pente ou du remblai; par l'érosion du remblayage; ou par un excès d'érosion latérale ou d'affouillement à l'intersection des cours d'eau.

Après la mise hors service (Tableau 1, colonnes 11 et 12)

Après la mise hors service d'un pipeline, on peut s'attendre à une inversion de certains des effets dus à son exploitation. L'enlèvement du pipeline peut soit accélérer ou retarder l'arrivée finale à de nouvelles conditions d'équilibre.

S'il s'agit d'un pipeline souterrain qui était refroidi, on observera une fonte progressive des glaces excédentaires dans les zones qui ont été touchées par le foisonnement. Le dégel provoquera des affaissements et pourrait réduire la stabilité des pentes. Enfin, les eaux souterraines recommenceront à circuler librement après la disparition des manchons de gel. S'il s'agit d'un pipeline souterrain qui était réchauffé, on pourrait observer une aggradation progressive du pergélisol et un certain foisonnement dans les zones qui ont été touchées par les affaissements. Si le pipeline était en banquette, le tassement dû à la présence de cette dernière se poursuivra probablement à un rythme de moins en moins rapide pendant un certain temps après la mise hors service.

Les interactions avec les eaux de surface et les eaux souterraines et leurs effets seront dans l'ensemble similaires à ceux prévus pour la période précédant la mise en service. On observera notamment la formation d'étangs et l'érosion subséquente de l'emprise; l'écoulement des eaux souterraines dans le remblayage accompagné de la possibilité de son érosion; l'infiltration des eaux à travers les remblais du pipeline et des routes; et la formation saisonnière de tertres de gel et de glace qui pourraient obstruer les ponceaux, provoquant alors l'effondrement des remblais lors du dégel printanier.

Il est probable que les effets sur le terrain de l'abandon d'un pipeline apparaîtront aussitôt que l'entretien de l'emprise sera interrompu.

DONNÉES NÉCESSAIRES POUR DISCERNER LES PROBLÈMES À L'AVANCE

L'énumération précédente des problèmes indique clairement que la plupart des interactions sont reliées d'une manière ou d'une autre à la présence et à la circulation d'eau ou à la présence ou la génération de glace. En vue de discerner à l'avance la plupart des problèmes possibles, il sera nécessaire de recueillir des informations sur le niveau, le débit et la température des eaux souterraines; sur l'emplacement et le mode de formation des glaces naturelles par les eaux souterraines; et sur la répartition des sols (riches en glace) sensibles au gel et au dégel.

Il est possible de recueillir une partie de ces données (par exemple niveaux instantanés de la nappe phréatique, température de l'eau, répartition des glaces dans le sol) au cours de programmes de forage géotechnique. Par ailleurs, on peut déterminer en laboratoire la teneur en humidité et les conductivités hydraulique et thermique au moyen de l'étude d'échantillons de sol et de carottes. Enfin, on ne peut obtenir des renseignements sûrs à l'égard de la hauteur maximum de la nappe phréatique qu'en mesurant ou en enregistrant régulièrement (au moins une fois par semaine) le niveau de la nappe au cours d'au moins un an. À cet effet, de simples tubes munis d'encoches placés dans les trous de sondage géotechnique peuvent servir de puits d'observation. Pour déterminer les débits, il faut recueillir des données représentatives sur les perméabilités et les pentes. Il faudra d'observations répétées au cours de plusieurs hivers pour établir l'emplacement et le mode de formation des glaces naturelles.

REMERCIEMENTS

Les problèmes énumérés dans le présent document ont pu être identifiés grâce à la précieuse collaboration de: J.A. Banner, Division de recherche en hydrologie, ministère de l'Environnement; J.R. Ellwood, Foothills Pipe Lines (S. Yukon) Ltd.; O.L. Hughes, Division de la science des terrains, Commission géologique du Canada; et P.J Williams, Département de géographie, université Carleton. L'examen critique du manuscrit a été assuré par R.J.E. Brown, Division des recherches sur le bâtiment, Conseil national de recherches et par O.J. Ferrians, Jr., U.S. Geological Survey.

RÉFÉRENCES

Berger, T.R. 1977. The Report of the Mackenzie Valley Pipeline Inquiry. Vol. II. Approvisionnements et Services Canada, Ottawa, 268 pp.

Eager, W. L. et W.T. Pryor. 1945. Ice formation on the Alaska Highway. Public Roads, vol. 24, nº 3, pp. 55-74 et 82.

Ferrians, O.J., Jr., R. Kachadoorian et G.W. Greene. 1969. Permafrost and related engineering problems in Alaska. Rapport officiel nº 678 de l'U.S. Geol. Surv., 37 pp.

Mackay, J.R., J. Ostrick, C.P. Lewis et D.K. MacKay. 1979. Frost heave at ground temperature below 0°C, Inuvik, Northwest Territories. Commission géologique du Canada, rapport nº 79-1A, pp. 403-405.

van Everdingen, R.O. 1976. Geocryological terminology. Canadian Journal of Earth Sciences, vol. 13, nº 6, pp. 862-867.

van Everdingen, R.O. 1978. Frost mounds at Bear Rock near Fort Norman, Northwest Territories, 1975-1976. Canadian Journal of Earth Sciences, vol. 15, nº 2, pp. 263-276.